

累积和检验算法中的反馈机制研究

游 波, 蔡志明

(海军工程大学电子工程学院, 湖北武汉 430033)

摘 要: 提出建立累积和检验算法的反馈机制. 从匹配滤波器平方输出端信噪比序列的估算、归一化处理和门限的求取几方面研究了算法和信息反馈流程, 分析了信噪比失配对检测性能的影响以及门限信噪比设置对虚警性能的影响. 海试数据验证结果表明声场预报加结果反馈机制的应用使得累积和算法在处理低频低信噪比信号的性能上有显著提高, 算法性能优于常规时空背景均衡处理结果.

关键词: 累积和检验; 主动声纳; 反馈

中图分类号: TB5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 06-1434-04

On Feedback Mechanism of the Page Test

YOU Bo, CAI Zhi-ming

(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract: A feedback mechanism of the page test is proposed. From the aspects of the estimation of SNR on square output of the matched filter, normalization, and the gate calculation, the algorithm and information feedback flow are researched. We also study the effect of SNR mismatch on the detection performance and the effect of gate-SNR design on the false alarm performance. The experiment on the sea shows that the performance of the page test with sound field prediction and feedback mechanism is improved evidently when processing lower frequency signals with lower SNR, and its performance is better than the conventional space-time background equalization algorithm.

Key words: the page test; active sonar; feedback

1 引言

水声信道中的多途效应使得声纳接收信号发生畸变, 破坏信号检测时的复本信号相关性. B. Friedlander^[1] 尝试采用复本相关累加检测器(RCI), 通过多途目标回波能量的非相干累加来提高对信号的检测能力, 但实际信号的背景并非满足点点独立的条件, 特别是在混响限制区, 在对目标回波进行累加的同时, 信号背景(混响和噪声)也得到了累加, 因此检测信噪比并没有得到实质性提高^[3]. 2002年 Douglas A. Abraham 首次将瞬态变化检测算法——Page Test (累积和检验算法)应用于主动声纳抗多途信号处理^[2]. 2006年在意大利 NATO 水下研究中心, 该算法已经集成到低频主动声纳(LFAS)系统的信号处理链中^[4].

这种后置时间处理着重于两个基本点, 一是根据序列中目标信号出现与消失的本质, 即概率密度分布的变化, 利用级联在常规匹配滤波器之后的瞬态信号检测算法, 实现对多途信道中回波的检测. 该算法可判定信号的前后沿, 从而确定非相干累积的有效长度, 利用多途

能量提高检测效果; 二是充分利用信道的环境信息, 对属于同一目标的回波段进行与信噪比相关的能量累加. 匹配滤波器输出端的信噪比序列是基于一定的声场计算模型, 利用声纳方程进行估算得到, 其精确程度直接影响到算法的检测性能.

本文研究了信噪比失配对算法性能造成的影响, 提出了在算法实现过程中建立声场预报加结果反馈机制, 减少因随机干扰而导致的输出波动, 从而平滑背景. 该机制解决了工程应用问题, 使得算法性能在实际海洋环境中良好且稳健. 海试数据的验证结果表明该算法性能优于常规时空归一化背景均衡处理结果.

2 累积和算法原理和在主动声纳信号处理中的应用

累积和检验算法等价为一循环往复的序贯检测, 检验统计量为

$$\begin{cases} W_0 = 0 \\ W_n = \max\{0, W_{n-1} + g(y[n])\} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $g(y)$ 为检测器非线性量. 要求满足: $E[g | H_0] \leq 0 < E[g | H_1]$. 即当变化没有发生时, 检验统计量 W_n 的

值都以大的概率置零,不易实现累加超门限;在变化持续时间内, W_n 以较大概率大于0,容易累加超门限实现检测.主动声纳回波的概率分布具有瞬态变化特点,如式(2),这为累积和检验算法在主动声纳检测中的应用提供了可能.

$$Y_n \sim \begin{cases} f_0(y_n), & n < n_s \\ f_1(y_n), & n_s \leq n_0 < n_e \\ f_0(y_n), & n \geq n_e \end{cases} \quad (2)$$

其中: n_s 和 n_e 分别表示瞬态变化发生和结束时刻.

2.1 累积和检测处理流程和信息反馈机制

累积和检测算法应用于主动声纳信号检测时的处理流程和信息反馈如图1所示.左侧的步骤是需要利用声场计算模型进行预报或预先设定的.实际海洋环境和声场预报结果间的误差通过右侧的反馈信息来修正.预报步骤包括:利用射线理论预测出的回波扩展时间来确定归一化步骤中保护段长度;在预报声场传播损失和混响强度的基础上,利用声纳方程估算得到匹配滤波器输出端信噪比序列,来调整算法中检验统计量的大小;将声纳操作员能从背景噪声中准确判断目标回波的最低信噪比10dB设定为计算门限信噪比.反馈步骤包括:利用累积和检验算法初步检测结果,即目标回波信号上升下降沿信息来修正回波扩展时间的预报结果;利用算法初步检测结果中目标可能出现处的信噪比值来调节估计信噪比序列的幅度;为避免低门限带来的高虚警问题,对于低信噪比目标,需重新设定计算门限信噪比.

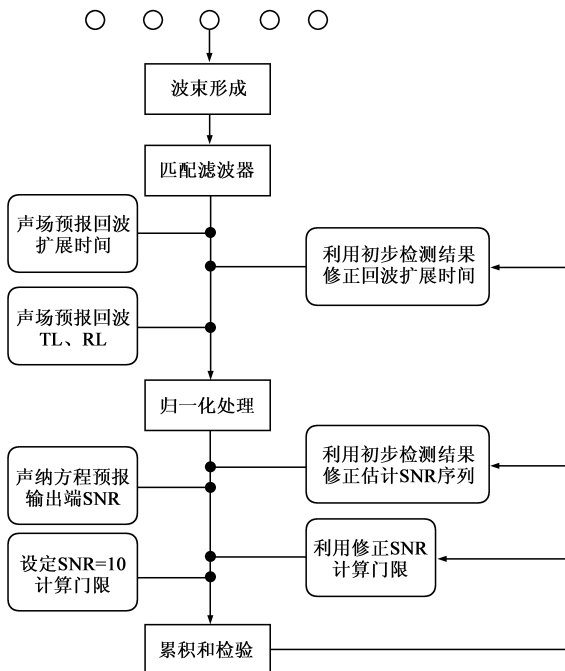


图1 累积和检测算法处理流程和信息反馈图

2.2 信噪比的估算及对检测性能的影响

搬移到基带的主动声纳回波信号经过归一化处理,满足以下概率分布密度形式:

$$H_0: y(n) \sim \chi_2^2(0) \quad H_1: y(n) \sim \chi_2^2(\delta(n)) \quad (3)$$

目标不存在时, $y(n)$ 为2个自由度的中心 χ^2 分布;当目标信号存在时, $y(n)$ 为2个自由度的非中心 χ^2 分布,非中心分布参数为 $\delta(n) = 2 \cdot 10^{\text{SNR}[n]/10}$,SNR是匹配滤波器平方输出端信噪比.根据非线性量 $g(y)$ 的表达和偏差 b 的选取原则^[5],有:

$$g(y) = y - b, \quad b = L \left(1 + \frac{L}{\delta} \right) \log \left(1 + \frac{\delta}{L} \right) \quad (4)$$

式中: L 为 χ^2 分布的自由度.非线性量 $g(y)$ 除了与变化发生前后概率分布密度的形式有关,还与SNR有关.声纳方程提供了一种估算匹配滤波器输出端信噪比的方法,即:

$$\text{SNR}[n] = \text{SL} - \text{TL1}[n] - \text{TL2}[n] + \text{TS} - \text{RL}[n] + \text{GV} + \text{GT} \quad (5)$$

式中:SL为声源级,目标强度TS由估计值给出,GV为水听器阵的空间增益,GT为匹配滤波器的时间处理增益,TL1、TL2分别表示为由发射阵到目标和由目标到接收阵的传播损失,它们和混响级RL的非相干强度一起均由声场预报获取.RL序列是基于归一化步骤估算得到的背景干扰序列,由预报的非相干强度调节其幅度得到,这一做法可以避免在实时处理时由记录电信号向水听器端接收声信号转换的繁琐步骤.

算法累积过程和性能直接受到估计SNR序列的影响.以从海上试验获取的某频段HFM主动声纳回波信号为基础进行仿真试验.在目标方位通道调节目标处信噪比,变化范围为4.8~11.8dB,在保证检测性能不变的前提下,得到估计信噪比的上、下限如图2所示.随着目标处SNR的增大,估计SNR的容许失配范围逐渐变大,但对于小信噪比信号,失配容限小.实际上通过声纳方程估计SNR序列,精度有限,而反馈机制可以提高估计SNR序列的精度,提高小信噪比信号的检测效果.

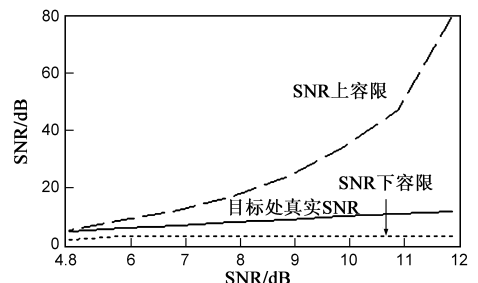


图2 累积和算法估计SNR失配容限分析

2.3 归一化处理

该算法主要采用削除平均(TM, Trimmed Mean)归一

化方法进行背景平稳化处理^[6,7]. 为了防止目标能量泄漏到参考窗影响背景噪声能量估计, 需将被检测单元附近一定数目的数据单元设置为保护段. 保护段的长度是由目标回波的扩展时间决定的. 由于归一化处理的步骤位于累积检验算法之前, 因而在尚未确定回波准确位置时, 主要利用由射线理论预报的多途信道时间扩展来近似目标回波的扩展时间.

在远距离、点目标和 δ 声源的假设下, 不考虑声源信号的具体形式和目标线度等因素, 利用射线理论的方法推导出双程传播时, 经点目标反射后的脉冲能量包络的具体形式如下^[8]:

$$p(\tau)d\tau = \frac{\pi}{2t_0} \exp\{-\alpha\tau/t_H\} d\tau \quad (6)$$

式中: 设直达声的到达时间为 $t_0 = r/c$, $t_H = H/c$, H 为海深, 定义变量 $\tau = t - t_0$, α 为掠射角小于临界掠射角时海底反射损失对掠射角的梯度. 可见回波包络的形状只与海深、声速和海底反射损失对掠射角的梯度有关. 在设定的门限下, 由该式可以得到信道的扩展时间, 即保护段的长度.

这种方法只能得到粗略的结果, 目的是给出保护段时间长度的量级. 实际上, 将累积和算法获取的回波扩展时间信息反馈给保护段时间长度, 可实现自适应归一化处理.

2.4 门限的求取

累积和检验算法确定门限的基本思想基于纽曼-皮尔逊准则. 设 $\alpha(N_{\max})$ 为在长度为 N_{\max} 的时间段内发生一次或多次虚警的概率, 有^[9,10]

$$\alpha(N_{\max}) = F_N(N_{\max}) = \Pr\{N \leq N_{\max}\} \\ = 1 - \mathbf{1}^T \mathbf{C}_{N_{\max}} \mathbf{C}_{N_{\max}-1} \mathbf{C}_{N_{\max}-2} \cdots \mathbf{C}_1 \mathbf{u}_0 \quad (7)$$

其中: \mathbf{C}_n 为 n 时刻在 H_0 假设下的马尔可夫状态传输矩阵, $\mathbf{1}^T = [1, 1, \dots, 1]$; $\mathbf{u}_0 = \mathbf{e}_0 = [1, 0, \dots, 0]^T$. 为减少运算量, 一般设 \mathbf{C}_n 是非时变的. 取:

$$\alpha(N_{\max}) = 1 - \mathbf{1}^T \mathbf{C}_0^N \mathbf{u}_0 \quad (8)$$

其中: \mathbf{C}_0 为最低可检测信噪比信号的状态传输矩阵, 该信噪比即为计算门限信噪比. 实时处理时设为 10dB, 对应声纳操作员能从背景噪声中准确判断目标的最低信噪比. 一般采用矩阵法来计算式(8).

实际上在回波序列的后段和信噪比较低的一些方位通道, 实际信噪比很小, 由 10dB 计算得到的门限偏低, 导致虚警增加. 因此需要将目标处的实际信噪比反馈给门限信噪比, 具体做法是可以根据前一个 ping 的信噪比计算结果作为后一个 ping 的计算依据, 或将累积和算法检测结果中目标回波可能出现处的实际信噪比进行反馈, 修正门限信噪比.

3 海试数据验证

某海域环境参数见表 1, 等声速梯度水层, 声源位于 10m 深度, 96 元线列阵声纳发射带宽为 500Hz 的双曲调频信号, 声源级 210dB. 利用简正波方法估计混响非相干强度, 计算浅海传播损失; 水下目标由近及远运动, 目标强度 8dB; 利用射线方法得到的信道扩展时间量级为 0.06s, 作为归一化步骤中保护段的长度.

表 1 某海域环境参数表

海深	海水声速	海底声速	海底密度	海底衰减系数	反射损失梯度
70m	1520 m/s	1709m/s	1.88 kg/m ³	0.5 dB/λ	0.48 rad ⁻¹

图 3、图 4 分别为高频段和低频段两组 HFM 主动声纳回波信号的常规时空背景均衡结果和累积和检验结果. 两种方法均能有效平滑混响, 前者的背景上仍有较多杂波干扰点, 相比之下累积和检验背景干净, 目标突出. 对于信噪比较低低频信号, 常规时空均衡处理已无法从背景中分辨出目标, 累积和算法还是可以清晰地分辨目标. 除了预报和反馈步骤外, 两者计算效率相当, 均可在工程上实现实时处理.

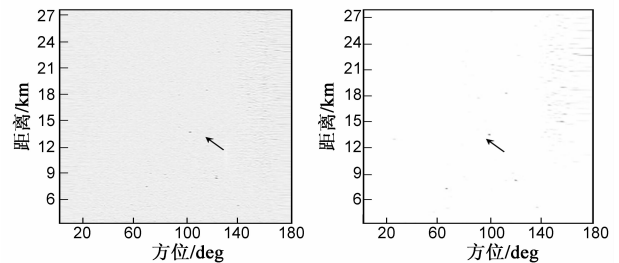


图 3 高频段 HFM 信号常规时空背景均衡与累积和检验处理结果对比

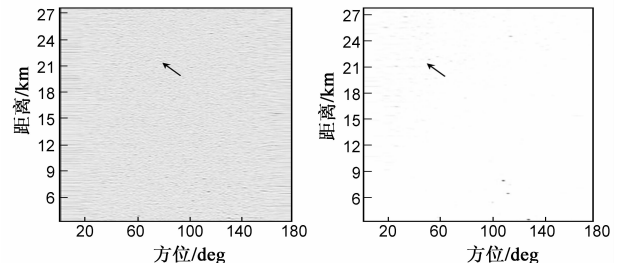


图 4 低频段信号常规时空背景均衡与累积和检验处理结果对比

4 结论

本文提出建立累积和检验算法中的反馈机制. 从匹配滤波器平方输出端信噪比序列的估算、归一化处理和门限的求取几个方面详细研究了算法处理和信息反馈流程, 分析了信噪比失配对检测性能的影响以及计算门限信噪比的设置对虚警性能的影响. 通过分析得出: 声场预报加结果反馈机制的应用, 充分引入环境信息, 使得累积和算法在处理低频低信噪比信号的性能上有显著提高, 能更好地适应接收机输入背景的变

化,检测性能在实际海洋环境中良好且稳健.海试数据验证结果表明该算法性能优于常规时空背景均衡处理结果.

参考文献:

- [1] Benjamin Friedlander. Detection of broadband signals in frequency and time dispersive channels[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(7): 1613 – 1622.
- [2] Douglas A Abraham, Peter K Willett. Active sonar detection in shallow water using the page test [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(1): 35 – 46.
- [3] 姜可宇, 蔡志明. 海底混响中基于前后向预测模型的信号检测[J]. 电子学报, 2007, 35(9): 7 – 8.
JIANG Ke-yu, CAI Zhi-ming. Forward and backward prediction model based signal detection in sea bottom reverberation [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(9): 7 – 8. (in Chinese)
- [4] Alberto Baldacci, Georgios Haralabus. Signal Processing for an Active Sonar System Suitable for Advanced Sensor Technology Applications and Environmental Adaptation Schemes [R]. Italy: SACLANT Undersea Research Centre, 2006, NURC-PR-019.
- [5] Douglas A Abraham. Asymptotically optimal bias for a general nonlinearity in page's test [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electron Systems, 1996, 32(1): 360 – 367.
- [6] Baldacci A, Haralabus G. Adaptive Normalization of Active Sonar Data [R]. Italy: SACLANT Undersea Research Centre, 2006, NURC-PR-013.
- [7] 游波, 蔡志明. 主动声纳信号归一化算法参数问题研究 [J]. 声学技术, 2007, 26(5): 78 – 80.
- YOU Bo, CAI Zhi-ming. Research of parameters in the normalization algorithm of active sonar data. Technical Acoustics. 2007, 26(5): 78 – 80. (in Chinese)
- [8] Harrison C H. Closed-form expressions for ocean reverberation and signal excess with mode stripping and Lambert's law [J]. Journal Acoustical Society of America, 2003, 114(5): 2744 – 2756.
- [9] 游波, 蔡志明. 累积和算法应用于主动声纳抗多途检测时的门限确定方法 [J]. 声学技术, 2009, 28(3): 303 – 306.
YOU Bo, CAI Zhi-ming. The threshold calculating method of the Page Test used to detect active sonar multipath signals [J]. Technical Acoustics. 2009, 28(3): 303 – 306. (in Chinese)
- [10] Chunming Han, Peter K Willett. Some methods to evaluate the performance of Page's Test as used to detect transient signals [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(8): 2112 – 2127.

作者简介:



游波 女, 1976 年生, 江苏泰州人, 海军工程大学水声教研室讲师, 博士研究生, 主要研究方向为匹配场信号处理、主动声纳抗多途信号处理等。

E-mail: bbyouyou2002@yahoo.com.cn

蔡志明 男, 1962 年生, 浙江湖州人, 海军工程大学水声教研室教授, 博士生导师, 中国声学学会理事. 主要研究方向为信号处理、水声物理、水声对抗及声纳技术等。

